

DORMENTES FERROVIÁRIOS CONSTITUÍDOS DE RESINA DE MAMONA E RESÍDUO DE ACIARIA

RAILWAY SLEEVES MADE OF CASTOR BEAN RESIN AND STEEL MILL WASTE

Laura Oliveira Gomes

Aluna de Engenharia de Materiais, 8º período
UFRJ Período PIBIC CETEM: outubro de 2022 a julho de 2023
lauraoliv.g@poli.ufrj.br

Roberto Carlos da Conceição Ribeiro

Orientador, Eng. Químico, D.Sc.

Nuria Fernández Castro

Coorientadora, Eng. de Minas, D.Sc.

RESUMO

A crescente geração de resíduos pela indústria siderúrgica representa um importante desafio ambiental, econômico e tecnológico, exigindo o desenvolvimento de alternativas capazes de promover sua valorização e reinserção em cadeias produtivas, pois apresentam elevado potencial para utilização como cargas minerais em compósitos poliméricos estruturais. Paralelamente, a necessidade de substituir dormentes ferroviários convencionais de madeira por materiais de maior durabilidade e menor impacto ambiental tem impulsionado pesquisas voltadas ao desenvolvimento de compósitos sustentáveis. Neste trabalho foi investigado o emprego de resíduos de aciaria como fase dispersa em matriz de óleo de mamona visando gerar dormentes ferroviários sustentáveis. Foram produzidas formulações contendo entre 10 e 80% em massa de resíduo, posteriormente submetidas à caracterização mecânica, colorimétrica e ambiental por meio de ensaios de resistência à compressão, dureza superficial e alterabilidade acelerada em ambiente salino e de SO₂, com realização novamente de ensaios mecânicos e avaliação da lixiviação de metais por ICP-OES. Os resultados evidenciaram que a formulação contendo aproximadamente 60% de resíduo apresentou o melhor desempenho global, combinando elevada resistência mecânica, maior dureza superficial, estabilidade dimensional e excelente comportamento frente aos ensaios de envelhecimento acelerado. Os testes de lixiviação demonstraram baixa mobilidade dos elementos metálicos presentes no resíduo, indicando eficiente encapsulamento da carga pela matriz polimérica e reduzido risco ambiental durante sua utilização. Os resultados obtidos demonstram que a incorporação de elevados teores de resíduos siderúrgicos em matrizes poliuretânicas de origem renovável constitui uma alternativa tecnicamente viável para fabricação de dormentes ferroviários, contribuindo simultaneamente para a economia circular e a redução da disposição de resíduos industriais.

Palavras-chave: Resíduos de aciaria, resina de mamona, dormentes de ferrovia.

ABSTRACT

The increasing generation of waste by the steel industry represents a significant environmental, economic, and technological challenge, requiring the development of alternatives capable of promoting its valorization and reintegration into production chains, as it presents high potential for use as mineral fillers in structural polymer composites. In parallel, the need to replace conventional wooden railway sleepers with materials of greater durability and lower environmental impact has driven research focused on the development of sustainable composites. This work investigated the use of steelmaking waste as a dispersed phase in a castor oil matrix aiming to generate sustainable railway sleepers. Formulations containing between 10 and 80% by mass of residue were produced and subsequently subjected to mechanical,

colorimetric, and environmental characterization through compression strength, surface hardness, and accelerated alterability tests in saline and SO₂ environments. Mechanical tests and metal leaching evaluation by ICP-OES were also performed. The results showed that the formulation containing approximately 60% residue presented the best overall performance, combining high mechanical strength, greater surface hardness, dimensional stability, and excellent behavior in accelerated aging tests. Leaching tests demonstrated low mobility of the metallic elements present in the residue, indicating efficient encapsulation of the filler by the polymeric matrix and reduced environmental risk during its use. The results obtained demonstrate that the incorporation of high levels of steelmaking residues into polyurethane matrices of renewable origin constitutes a technically viable alternative for the manufacture of railway sleepers, simultaneously contributing to the circular economy and the reduction of industrial waste disposal.

Keywords: Steelmaking waste; polyurethane; polymer composites; circular economy.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da produção mundial de aço tem sido acompanhado por um aumento proporcional na geração de resíduos sólidos provenientes dos processos siderúrgicos. Durante as etapas de redução, refino, lingotamento e laminação são produzidos diferentes subprodutos, destacando-se escórias de aciaria, carepas de laminação, poeiras de filtros e lamas industriais. Embora parte desses materiais seja reutilizada internamente na própria siderurgia ou em cimenteiras, uma fração significativa é destinada a aterros, acarretando elevados custos de disposição final e potenciais impactos ambientais (Zacul, 2022).

Nos últimos anos, diversos estudos têm demonstrado que a utilização de cargas minerais oriundas de resíduos industriais pode promover melhorias significativas nas propriedades mecânicas de compósitos, especialmente quando existe adequada compatibilidade entre a fase particulada e a matriz polimérica. A eficiência desse reforço depende de fatores como granulometria, distribuição das partículas, fração volumétrica, energia superficial e qualidade da adesão interfacial, parâmetros que controlam os mecanismos de transferência de tensões e retardam a nucleação e propagação de trincas durante solicitações mecânicas. Paralelamente, a infraestrutura ferroviária enfrenta desafios relacionados à substituição dos dormentes convencionais de madeira tratada. Dormentes de madeira apresentam elevada variabilidade dimensional, susceptibilidade ao ataque biológico e dependem do emprego de produtos químicos potencialmente tóxicos (CDuran et al., 2025).

Nesse contexto, os compósitos poliméricos surgem como uma alternativa, pois permitem combinar elevada resistência específica, menor massa, elevada resistência química e excelente estabilidade frente às intempéries. Entre as matrizes disponíveis, os poliuretanos derivados do óleo de mamona destacam-se por serem obtidos a partir de matéria-prima renovável, apresentarem baixa toxicidade, elevada estabilidade dimensional, boa resistência mecânica e reduzida absorção de água (Brito, 2021).

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho foi desenvolver compósitos poliméricos estruturais destinados à fabricação de dormentes ferroviários sustentáveis, utilizando resíduos de aciaria como carga mineral em matriz poliuretânica derivada de óleo de mamona.

3. METODOLOGIA

A matriz polimérica empregada foi constituída por um óleo de mamona (*Ricinus communis*) e como fase dispersa foi utilizado resíduo sólido proveniente de uma usina siderúrgica, constituído predominantemente por óxidos metálicos característicos de resíduos de aciaria. Antes da utilização, o material foi submetido à etapa de cominuição até obtenção de granulometria média de aproximadamente 150 µm, visando aumentar a homogeneidade da

dispersão na matriz polimérica e favorecer a interação interfacial entre as fases. Foram produzidas formulações contendo 10, 20, 30, 50, 60, 70 e 80% em massa de resíduo. O comportamento mecânico dos compósitos foi avaliado por meio de ensaios de compressão (ASTM D695), A dureza superficial dos compósitos foi determinada pela ASTM D785. A colorimetria foi realizada por meio da determinação dos parâmetros colorimétricos do sistema CIELab (L^* , a^* e b^*). Os compósitos foram submetidos em câmaras de alterabilidade de névoa salina e SO_2 , sendo avaliadas mecanicamente, posteriormente. A segurança ambiental dos compósitos foi investigada por meio da análise da água proveniente dos ensaios de alterabilidade, que foram submetidas à determinação das concentrações de elementos metálicos utilizando Espectrometria Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 1 estão apresentados os resultados da dureza superficial dos compósitos contendo diferentes frações mássicas de resíduo de aciaria. Observa-se que a incorporação da carga mineral exerceu influência significativa sobre o comportamento mecânico superficial do material, evidenciando que o desempenho do compósito depende não apenas da quantidade de partículas adicionadas, mas principalmente da qualidade da dispersão da fase mineral na matriz poliuretânica. As formulações contendo 10% e 20% de resíduo apresentaram elevados valores de dureza, indicando que, nessas concentrações, ocorreu adequada interação entre a matriz de poliuretano derivada do óleo de mamona e as partículas minerais. Em baixas concentrações de carga, as partículas tendem a permanecer completamente envolvidas pela matriz polimérica, favorecendo uma eficiente transferência das tensões mecânicas aplicadas durante o ensaio de endentação. Esse comportamento é corroborado por Fu et al. (2008) e Li et al. (2022), nos quais pequenas frações de cargas minerais atuam como elementos rígidos dispersos na matriz, restringindo a mobilidade das cadeias poliméricas e aumentando a resistência à deformação localizada. Nessa condição, o poliuretano mantém sua continuidade estrutural enquanto a carga contribui para elevar a rigidez superficial sem comprometer a integridade do material. Na formulação contendo 60% de resíduo há uma recuperação significativa da dureza, constituindo o melhor desempenho entre as formulações com elevada incorporação de carga mineral. Esse resultado sugere que, nessa composição, foi alcançado um equilíbrio entre a quantidade de partículas incorporadas e a capacidade da matriz poliuretânica de promover seu encapsulamento. A manutenção da dureza após o envelhecimento acelerado sugere que a difusão de água e íons para o interior do compósito ocorreu de forma limitada, preservando a integridade da interface matriz-partícula.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros colorimétricos L^* , a^* , b^* e do brilho superficial (G) onde observa-se uma redução progressiva do parâmetro L^* à medida que se aumenta o teor de resíduo incorporado à matriz poliuretânica, evidenciando o escurecimento gradual dos compósitos. Esse comportamento está diretamente relacionado à composição mineralógica do resíduo de aciaria, cuja elevada concentração de óxidos de ferro, manganês e outros compostos inorgânicos apresenta coloração naturalmente escura. Todas as formulações permaneceram dentro da faixa cromática correspondente aos tons de cinza, característica considerada adequada para componentes ferroviários. Do ponto de vista da ciência dos materiais, esse comportamento demonstra que a fase mineral se encontra relativamente homogênea quanto à sua composição química, não havendo predominância de compostos capazes de modificar significativamente o espectro de reflexão visível da superfície do compósito. Além disso, a estabilidade desses parâmetros sugere que o processo de cura do poliuretano não promoveu reações de oxidação ou degradação capazes de alterar a coloração da matriz. As formulações contendo 10% e 20% de resíduo apresentaram os maiores valores de brilho, resultado esperado em função da predominância da fase polimérica contínua. Nessas composições, a superfície permanece mais lisa e homogênea, favorecendo a reflexão uniforme da luz incidente. À medida que o teor de resíduo aumenta, especialmente acima de 50%, ocorre maior participação da fase mineral na superfície externa do material, reduzindo o efeito de nivelamento proporcionado pela matriz poliuretânica durante a cura. Embora a redução do brilho possa ser interpretada como perda estética em determinadas aplicações, essa característica não representa uma desvantagem para

dormentes ferroviários, pois superfícies menos brilhantes tendem a apresentar menor suscetibilidade à visualização de pequenas abrasões superficiais produzidas pelo contato com os sistemas de fixação dos trilhos. Outro aspecto importante diz respeito à estabilidade colorimétrica após os ensaios de alterabilidade. Conforme observado experimentalmente, não foram identificadas modificações significativas nos parâmetros colorimétricos nem no brilho após a exposição do intemperismo.

Tabela 1: Avaliação colorimétrica das amostras.

Média	L	A	b	C
10%	32.08	1.49	3.87	6.18
20%	33.92	1.62	3.99	7.4
30%	31.83	1.37	2.58	5.6
50%	30.53	1.72	2.73	3.2
60%	29.70	1.57	2.10	2.3
70%	28.24	1.57	2.07	1.99

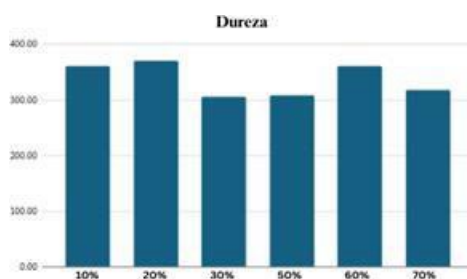


Figura 1: Dureza dos CPs.

Os resultados dos ensaios de compressão (Figura 1) demonstram que a incorporação do resíduo de aciaria influenciou significativamente o comportamento mecânico dos compósitos. De maneira geral, observou-se que o aumento do teor de carga promoveu modificações na capacidade de suporte de carga do material, sendo possível identificar uma composição ótima correspondente à formulação contendo aproximadamente 60% em massa de resíduo. A tensão máxima de ruptura variou entre as diferentes formulações, atingindo 1,905 kgf/mm² para o compósito contendo 10% de resíduo e 1,885 kgf/mm² para a formulação com 60%, diferença inferior a 2%. Embora a formulação de menor teor de carga tenha apresentado o maior valor absoluto de resistência, a composição com 60% incorporou seis vezes mais resíduo industrial, mantendo praticamente o mesmo desempenho mecânico. Sob o ponto de vista da engenharia de materiais, esse resultado é extremamente relevante, pois demonstra elevada eficiência da matriz poliuretânica em promover a transferência de tensões para uma quantidade significativamente maior de partículas minerais. Assim, obtém-se um compósito com elevado aproveitamento de resíduos industriais sem perda significativa de desempenho estrutural. Esse comportamento pode ser explicado pela atuação conjunta de três mecanismos principais de reforço: transferência de carga entre matriz e partículas; restrição da mobilidade das cadeias poliméricas e efeito de empacotamento da fase mineral. A incorporação crescente de partículas reduz o espaço disponível para movimentação das cadeias poliméricas durante a deformação, aumentando a rigidez do material e retardando o desenvolvimento de deformações permanentes. Esse comportamento explica a elevada resistência observada na formulação contendo 60% de resíduo. Nessa composição, a matriz permanece contínua, mas suficientemente preenchida pela fase mineral para limitar a deformação sem comprometer sua integridade estrutural. Entretanto, observa-se que as formulações contendo 50% e 70% de resíduo apresentaram redução da tensão máxima de ruptura quando comparadas às demais composições. Esse comportamento indica que o aumento da fração mineral, isoladamente, não garante melhoria contínua das propriedades mecânicas. Outro aspecto importante refere-se ao deslocamento até a ruptura, cujos valores permaneceram compreendidos entre 27,15 mm e 28,75 mm para todas as formulações.

A pequena variação observada indica que a incorporação do resíduo não alterou significativamente a capacidade global de deformação do sistema antes da falha. Sob a perspectiva da mecânica dos materiais, esse resultado demonstra que o poliuretano manteve sua capacidade de absorção de energia mesmo após a incorporação de elevados teores de carga mineral. As curvas Força $\times$ Deslocamento apresentadas na Figura 2 reforçam essa interpretação. A formulação contendo 60% de resíduo apresentou comportamento mecânico estável durante todo o carregamento, suportando elevadas cargas antes da ruptura. Os ensaios de alterabilidade demonstraram que os compósitos mantiveram suas propriedades mecânicas e colorimétricas após a exposição às condições aceleradas de envelhecimento (Figura 3), indicando elevada estabilidade físico-química da matriz poliuretânica reforçada com resíduo de aciaria. Esse comportamento pode ser atribuído, inicialmente, ao elevado grau de reticulação desenvolvido durante a cura da resina poliuretânica derivada do óleo de mamona. Após a formação das ligações uretânicas, estabelece-se uma rede tridimensional que restringe significativamente a mobilidade das cadeias poliméricas, reduzindo processos de relaxação estrutural, inchamento e degradação induzida por agentes ambientais. Sob o ponto de vista microestrutural, a baixa absorção de água pode ser explicada pelo elevado grau de reticulação da matriz e pela elevada fração de partículas minerais, que reduzem o volume livre disponível para difusão da solução aquosa. Além disso, o encapsulamento das partículas pelo poliuretano dificulta o contato direto do meio agressivo com os constituintes minerais do resíduo, reduzindo processos de dissolução superficial e preservando a continuidade estrutural do compósito. Inclusive, não foram verificadas lixiviações significativas na avaliação das águas por meio ICP-OES demonstraram que os compósitos apresentaram elevada estabilidade química após exposição ao meio salino e de SO₂. O ferro apresentou concentrações variando entre 2,8 e 16,4 mg L⁻¹, enquanto o alumínio, manganês, magnésio e cromo permaneceram abaixo do limite de detecção analítica em todas as formulações.

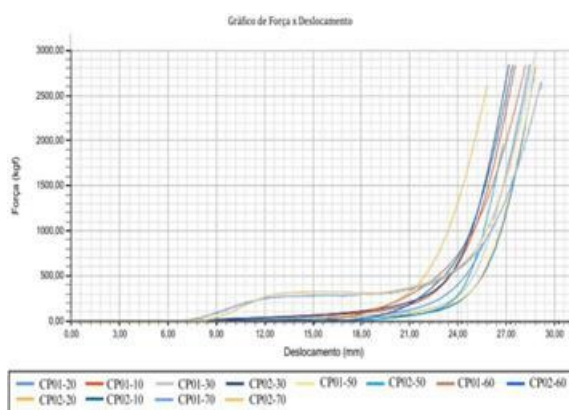


Figura 2: Força x Deslocamento das amostras.

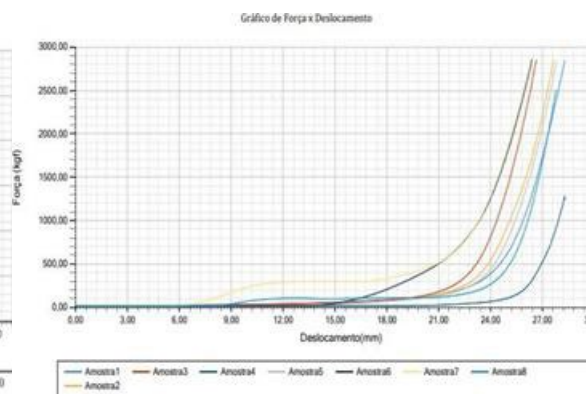


Figura 3: Força x deslocamento das amostras após intempéries.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade técnica e ambiental da fabricação de dormentes ferroviários. A incorporação do resíduo siderúrgico como carga mineral possibilitou a valorização de um subproduto industrial de difícil disposição, contribuindo para a redução dos impactos ambientais associados ao descarte desses materiais e promovendo princípios relacionados à economia circular. Entre as formulações avaliadas, a composição contendo 60% de resíduo de aciaria apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e elevado aproveitamento do resíduo. Os ensaios de alterabilidade demonstraram que os compósitos mantiveram suas propriedades mecânicas e características superficiais. Além disso, as análises de lixiviação confirmaram a baixa mobilidade dos elementos metálicos presentes no resíduo, não sendo observada liberação de metais pesados em concentrações que representassem riscos ambientais ou à saúde humana.

6. AGRADECIMENTOS

Ao CETEM pela infraestrutura laboratorial e ao CNPq pela bolsa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D2244 – Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates.

BRITO, M. M. et al. (2021). Aplicações de resíduos da siderurgia em materiais de construção. *Revista Materiais e Sustentabilidade*, 6(1), 34-44.

CALLISTER, W. D.; Rethwisch, D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10th ed.

CDURAN, A.J.F.P., Lyra, G.P., Campos Filho, L.E. et al. (2025). *The Use of Castor Oil Resin on Particleboards: A Systematic Performance Review and Life Cycle Assessment*. *Sustainability*, 17(8).

FU, S. Y.; Feng, X. Q.; Lauke, B.; Mai, Y. W. (2008). Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. *Composites Part B*.

RONDA FILHO, Wallace Maurício Maia. Gerenciamento dos resíduos sólidos gerados na aciaria LD. 2011. 61 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SILVA, F. A., Valdés, S., Oliveira, J. C., Costa, D. e Guerrero Martin, C.A. (2023). *Production of Biodegradable Polymeric Composites with the Addition of Waste*. *Materials*, 16(18), 6305.

SILVA, R. C. et al. (2019). Caracterização de resinas vegetais para aplicação em compósitos estruturais. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 29(3), e2019023.

SOUZA, A. L. et al. (2020). Potencial da resina de mamona em substituição a matrizes poliméricas sintéticas. *Revista de Materiais Renováveis*, 8(4), 102-112.

ZANCUL, E. S. et al. (2022). Compósitos sustentáveis para infraestrutura ferroviária. *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Materiais*, 13(2), 778-789.